



# Déformation interactive par skinning à volume constant

Damien Rohmer, Stefanie Hahmann, Marie-Paule Cani

## ► To cite this version:

Damien Rohmer, Stefanie Hahmann, Marie-Paule Cani. Déformation interactive par skinning à volume constant. GTMG - Groupe de travail en modélisation géométrique, Mar 2008, Mulhouse, France. hal-00516435v2

**HAL Id: hal-00516435**

**<https://hal.science/hal-00516435v2>**

Submitted on 24 Sep 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Déformation interactive par skinning à volume constant

D. ROHMER & S. HAHMANN & M-P. CANI

Laboratoire Jean-Kuntzmann, Universités de Grenoble.

damien.rohmer, stefanie.hahmann, marie-paule.cani@imag.fr

## Résumé

*La déformation de personnages animés par la méthode de skinning est largement répandue dans le domaine du cinéma et du jeu vidéo grâce à son contrôle intuitif et à son évaluation rapide. Cependant, pour certains mouvements, l'aspect réaliste de l'animation peut être mis en défaut par la perte d'une partie du volume du personnage déformé. Cet article présente une méthode de contrainte de volume appliquée à la déformation d'un objet à l'aide d'un squelette d'animation. Nous procédons en une première étape de déformation par skinning classique, puis corrigeons le volume de la surface obtenue dans un second temps. La correction est obtenue par une minimisation sous contrainte dont les paramètres sont liés aux seules données du skinning. Une solution analytique est obtenue, permettant une exécution de l'algorithme à plus de 30 images par secondes. Le volume du personnage ainsi déformé peut alors être corrigé de façon exacte dans le cas d'un traitement séparé des axes. Une méthode approchée est également mise en place pour permettre une correction liée localement à la forme de l'objet animé. La méthode utilisée permet une déformation à volume constant tout en préservant la simplicité et la rapidité d'exécution du skinning. Celle-ci est intrinsèquement liée aux paramètres de la déformation par squelette et ne requiert pas de travail supplémentaire de l'artiste. Enfin, différents effets visuels peuvent être obtenus selon l'optimisation utilisée.*

**Mots-clés :** déformation, skinning, volume constant

## 1 Introduction

Les déformations interactives et réalistes de personnages ou animaux sont d'un grand intérêt pour l'industrie de l'audio-visuel. Afin de pouvoir être utilisées dans le cas des jeux vidéos, films ou environnements virtuels, des outils permettant de déformer la peau de façon réaliste doivent être développés. Le comportement naturel des objets déformés doit être pris en compte de façon rapide et automatique pour éviter le travail fastidieux souvent demandé aux artistes. La déformation par skinning ou "Skeletal Subspace Deformation" (SSD) est largement utilisée pour l'animation de personnages de par son contrôle intuitif d'un squelette sous-jacent ainsi que par la rapidité de sa mise en oeuvre. Cependant, cette méthode est mise en défaut lors de l'application de grandes déformations. La perte de volume typique ("collapsing elbow") limite fortement son application pour une scène réaliste.

La conservation du volume d'un objet est bien connue dans le domaine de l'informatique graphique pour obtenir un aspect naturel lors d'une déformation. D'un point de vue physique, la déformation de modèles incompressibles s'obtient également à volume constant.

Le but de ce travail est ainsi d'améliorer la méthode simple et répandue du skinning avec une contrainte de conservation de volume.

La préservation de volume d'un objet déformé soulève différents problèmes. Du fait de l'action de la déformation et de la structure interne de l'objet, la correction doit être localisée en certaines régions. Bien que les méthodes basées sur la physique satisfont ces critères, elles ne s'appliquent pas en temps-réel. Le développement d'une approche purement géométrique qui préserve le volume de façon réaliste d'après la seule connaissance d'un squelette d'animation reste un challenge.

Cet article présente une méthode de déformation géométrique appliquée en surcouche du skinning classique et permettant d'éviter la perte de volume induite. Les contributions principales sont présentées dans les parties 3 à 5. Après avoir introduit le cadre mathématique général de la restauration du volume d'une surface déformée, une méthode de correction locale basée sur les paramètres du skinning sera alors mise en place. Enfin, une restauration normale à la surface sera explicitée ainsi que la possibilité d'obtenir

différents effets modélisant les matériaux sous-jacents.

## 2 État de l'art

Nous décrivons dans un premier temps certains travaux dont s'inspire ce travail.

La méthode de déformation par skinning (SSD) qui lie une surface à un squelette d'animation à l'aide d'un ensemble de poids d'influence est largement utilisée lors de déformations de personnages animés. Les artistes habitués à cette méthode passent souvent de nombreuses heures à fixer manuellement certains paramètres tels que les poids de skinning afin d'obtenir une déformation d'aspect réaliste où aucune zone ne subit de perte de volume visible.

Alors que la méthode de skinning originale reste non publiée dans la littérature scientifique, de nombreux articles s'emploient à améliorer ses défauts majeurs. La plupart se concentrent notamment sur le problème bien connu de perte de volume [LCF00] ("collapsing-elbow"). Les améliorations de la méthode originale peuvent généralement être classées en deux catégories :

Premièrement, celles basées sur l'apprentissage. Ces méthodes utilisent des procédés d'optimisation qui viennent ajuster certains paramètres tels que des vecteurs de corrections [KJP02], des matrices d'influences [WP02], ou des joints supplémentaires [MG03]. Cela permet notamment au skinning de créer des effets visuels tels que le gonflement d'un muscle si ceux-ci sont présent dans les poses d'apprentissages. Par exemple, Wang et al. [WPP07] suggèrent une régression linéaire entre les matrices de déformation sur les triangles de la surface et l'angle de rotation des joints. Des travaux récents [JT05, SY07, dATTS08] construisent également le squelette, le mouvement des joints ainsi que les poids de skinning de façon automatique. La principale limitation de ces méthodes concerne l'utilisation de poses d'apprentissages nécessitant le travail méticuleux d'un artiste, ou d'une simulation physique longue à mettre en place sur une version volumique de l'objet. Dans les deux cas, l'information seule de la surface et de son squelette associé n'est pas suffisante et nécessite une intervention humaine.

La deuxième famille d'approches propose des améliorations de la méthode de déformation elle-même. On peut citer l'utilisation de l'axe médian [Blo02], l'interpolation non-linéaire des matrices de déformation [Ale02], ou l'utilisation des quaternions [KZ05].

En comparaison avec le skinning classique, ces méthodes permettent d'utiliser des déformations plus larges tout en réduisant les artéfacts habituels. Les temps de calculs restent acceptables pour une utilisation interactive, cependant aucune de celles-ci ne se focalise sur la conservation de volume. Nous noterons d'ailleurs que ces méthodes utilisent les mêmes paramètres d'entrée que le skinning classique. Ainsi, la correction de volume proposée dans ce document peut s'appliquer directement sur celles-ci.

Dans une optique de préservation de volume, nous nous inspirerons notamment des travaux de Sauvage [SHB07] concernant l'application d'une minimisation sous contrainte afin de corriger la surface.

De nombreux travaux proposent également une meilleure représentation des surfaces. Les coordonnées laplaciennes sont un exemple adapté à la déformation de surfaces [SCOLA04]. L'application de cette représentation au skinning a déjà été étudié par Zhou et al. [ZHS<sup>+</sup>05]. La méthode est utilisée dans le cadre d'une préservation approximative de volume par la mise en place d'un maillage volumique. Une conservation exacte est également étudiée par Huang et al. [HSL<sup>+</sup>06] au prix de l'inversion d'une grande matrice creuse à chaque itération. Dans tout les cas, la correction de volume est présentée de manière globale, ou nécessite une intervention humaine afin de spécifier un traitement particulier pour une région spécifique. Cependant les effets de tissus adipeux ou muscles n'y sont pas observés. Nous recherchons donc une méthode automatique permettant de mettre en avant ces effets locaux en prenant le cas d'exemples simples.

Une méthode inspirée de la déformation spatiale à volume constant de Von Funck [FTS06] utilisant les champs vectoriels à divergence nulle a également été utilisée par Angelidis et Singh [AS07]. Ils expriment une méthode de déformation proche de l'expression d'un skinning réalisant une préservation de volume locale. Cette méthode permet la création de gonflements localisés, cependant sa limitation principale réside dans la nécessité d'intégration numérique de la position de chaque sommet le long des lignes de flux ce qui peut ralentir considérablement son utilisation dans le cas de surfaces complexes. Contrairement à cette application, l'approche utilisée dans ce rapport se base sur un skinning classique

où l'on applique de façon rapide une correction en surcouche afin de restaurer le volume.

### 3 Méthode de contrainte de volume exact

Nous allons tout d'abord décrire notre méthode générale de calcul de volume pour le domaine délimité par une surface. La correction sera alors exprimée en tant que solution d'une minimisation sous contrainte.

#### 3.1 Expression du Volume

Supposons que  $S = (V, F)$  soit une surface compacte triangulée délimitant un domaine intérieur.  $V$  désigne l'ensemble des sommets alors que  $F$  désigne l'ensemble des faces orientées. On suppose que  $N = |V|$  représente le nombre de sommets de  $S$ . Son plongement  $\mathbf{p}(S)$  est une application des sommets  $k$  de  $S$  vers une position  $\mathbf{p}_k \in \mathbb{R}^3$ ,  $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$ .

En appliquant le théorème de Stokes à la surface  $S$ , il peut être montré que l'expression exacte du volume du domaine délimité par  $S$  est donné par l'expression trilineaire suivante [GOMP98] :

$$V = \frac{1}{6} \sum_{(i,j,k) \in F} (z_i + z_j + z_k) \begin{vmatrix} x_j - x_i & x_k - x_i \\ y_j - y_i & y_k - y_i \end{vmatrix}, \quad (1)$$

où  $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$  sont les coordonnées du sommet  $\mathbf{p}_\alpha$ .

On peut également interpréter cette formule de façon géométrique.  $V$  étant alors vue comme la somme des sous-volumes signés des prismes obtenues en projetant chaque triangle  $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_k)$  avec  $(i, j, k) \in F$  sur le plan  $(x, y)$  comme le montre la Fig. 1. Ici, le volume du prisme est donné par le produit entre l'aire

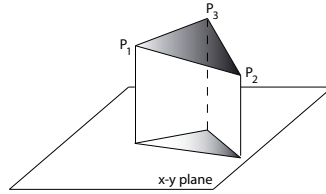


FIGURE 1 – Le volume du domaine bordé par la surface triangulée est calculé par la somme des volumes signés des prismes formés par la triangulation ainsi que leur projection sur le plan  $(x, y)$ .

signée du triangle projeté  $\frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_j - x_i & x_k - x_i \\ y_j - y_i & y_k - y_i \end{vmatrix}$  et par la hauteur moyenne  $\frac{1}{3}(z_i + z_j + z_k)$ .

En développant l'expression du volume selon les sommets, on obtient :

$$V = \sum_{(i,j,k) \in \llbracket 1, N \rrbracket} \beta_{ijk} x_i y_j z_k,$$

où  $\beta_{ijk}$  est un opérateur creux prenant en compte le 1-voisinage de chaque sommet. On remarque que le volume est une fonctionnelle trilineaire. En notant désormais  $\mathbf{p}_x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in \mathbb{R}^N$  le vecteur des coordonnées en  $x$  de tous les sommets de  $S$ , et de façon similaire  $\mathbf{p}_y$  et  $\mathbf{p}_z$ , on peut écrire

$$V(\mathbf{p}) = \langle \mathbf{p}_x, \nabla_x V \rangle_N = \langle \mathbf{p}_y, \nabla_y V \rangle_N = \langle \mathbf{p}_z, \nabla_z V \rangle_N,$$

où  $\langle, \rangle_N$  désigne le produit vectoriel dans  $\mathbb{R}^N$ , et où l'on exprime les composantes des gradients suivant

une coordonnée  $\nabla_{\mathbf{x}}V$ ,  $\nabla_{\mathbf{y}}V$  et  $\nabla_{\mathbf{z}}V$  pour un sommet  $\alpha$  par

$$\begin{cases} (\nabla_{\mathbf{x}}V)_{\alpha} := \sum_{(jk) \in \llbracket 1, N \rrbracket} \beta_{\alpha jk} y_j z_k \\ (\nabla_{\mathbf{y}}V)_{\alpha} := \sum_{(ik) \in \llbracket 1, N \rrbracket} \beta_{i\alpha k} x_i z_k \\ (\nabla_{\mathbf{z}}V)_{\alpha} := \sum_{(ij) \in \llbracket 1, N \rrbracket} \beta_{ij\alpha} x_i y_j \end{cases}$$

### 3.2 Correction de volume par minimisation

Supposons que nous sommes en présence d'une surface déformée (skinning ou tout autre méthode). Cette surface délimite un domaine dont le volume est noté  $V(\mathbf{p}_{\mathbf{x}}, \mathbf{p}_{\mathbf{y}}, \mathbf{p}_{\mathbf{z}})$ . On appellera  $\bar{V} = V(\bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{z}})$  le volume de la surface originale avant déformation. La différence de volume entre les deux domaines ainsi défini est noté  $\Delta V = V(\bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{z}}) - V(\mathbf{p}_{\mathbf{x}}, \mathbf{p}_{\mathbf{y}}, \mathbf{p}_{\mathbf{z}})$ .

On recherche désormais à rectifier la surface déformée afin de lui redonner son volume original. Pour cela, on définit un vecteur de correction  $\mathbf{u}^{\alpha} = (u_x^{\alpha}, u_y^{\alpha}, u_z^{\alpha}) \in \mathbb{R}^3$  pour chaque sommet  $\alpha$  comme le montre la Fig. 2. On note également le vecteur  $\mathbf{u}_{\mathbf{x}} = (u_x^1, u_x^2, \dots, u_x^N)$  et de façon identique pour  $\mathbf{u}_{\mathbf{y}}$  et  $\mathbf{u}_{\mathbf{z}}$ .

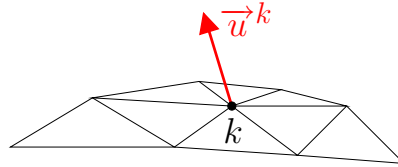


FIGURE 2 – Vecteur de correction  $\mathbf{u}_k$  associé à un sommet  $k$  afin de rectifier le volume.

La correction  $(\mathbf{u}_{\mathbf{x}}, \mathbf{u}_{\mathbf{y}}, \mathbf{u}_{\mathbf{z}})$  est choisie telle que

$$\begin{cases} \min & \|\mathbf{u}_{\mathbf{x}}\|^2 + \|\mathbf{u}_{\mathbf{y}}\|^2 + \|\mathbf{u}_{\mathbf{z}}\|^2 \\ \text{sujet à} & V(\mathbf{p}_{\mathbf{x}} + \mathbf{u}_{\mathbf{x}}, \mathbf{p}_{\mathbf{y}} + \mathbf{u}_{\mathbf{y}}, \mathbf{p}_{\mathbf{z}} + \mathbf{u}_{\mathbf{z}}) = \bar{V}. \end{cases} \quad (2)$$

La première minimisation consiste simplement à limiter la déformation à appliquer sur la forme. La seconde contrainte stricte consiste, quant à elle, à restaurer son volume original.

Afin de trouver une solution vérifiant les conditions de la minimisation, le problème est réécrit de façon équivalente en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange [Cia88]. On définit alors une fonctionnelle d'énergie

$$E(\mathbf{u}_{\mathbf{x}}, \mathbf{u}_{\mathbf{y}}, \mathbf{u}_{\mathbf{z}}, \lambda) = \begin{aligned} & (\|\mathbf{u}_{\mathbf{x}}\|^2 + \|\mathbf{u}_{\mathbf{y}}\|^2 + \|\mathbf{u}_{\mathbf{z}}\|^2) \\ & - \lambda(V(\mathbf{p}_{\mathbf{x}} + \mathbf{u}_{\mathbf{x}}, \mathbf{p}_{\mathbf{y}} + \mathbf{u}_{\mathbf{y}}, \mathbf{p}_{\mathbf{z}} + \mathbf{u}_{\mathbf{z}}) - V(\bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{p}}_{\mathbf{z}})) \end{aligned} \quad (3)$$

Une solution à l'eq. 2 revient alors au problème de minimisation de l'eq. 3 dont la solution vérifie  $\nabla E(\mathbf{u}_{\mathbf{x}}, \mathbf{u}_{\mathbf{y}}, \mathbf{u}_{\mathbf{z}}, \lambda) = 0$ .

### 3.3 Correction en trois étapes

Pour obtenir une méthode de correction rapide, la solution doit être exprimée de façon analytique. Afin d'obtenir un problème simple, nous utilisons la trilinearité de l'expression du volume suivant  $(x, y, z)$  comme proposé dans [Elb01]. La résolution est séparée en trois étapes successives afin de différencier le rôle des trois axes. Une étape de correction aura lieu d'abord suivant  $x$ , puis uniquement suivant  $y$  et enfin uniquement suivant  $z$  comme le montre la Fig. 3. Pour chaque passe, on partage la compensation de volume en trois parties.

Pour commencer, une correction est réalisée uniquement sur l'axe  $x$ . On corrige ainsi un tiers de la variation de volume. Dans cette partie, seul  $\mathbf{u}_{\mathbf{x}}$  est variable. En remarquant que  $V(\mathbf{p}_{\mathbf{x}} + \mathbf{u}_{\mathbf{x}}, \mathbf{p}_{\mathbf{y}}, \mathbf{p}_{\mathbf{z}}) - \bar{V} = <$

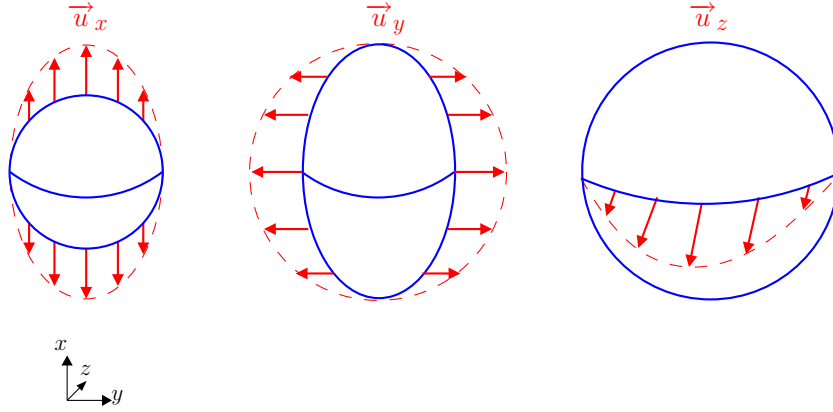


FIGURE 3 – Correction du volume en 3 étapes. Premièrement une correction est appliquée uniquement suivant l’axe  $x$ , dans une seconde étape, la correction est appliquée suivant  $y$ , puis enfin suivant  $z$ .

$\mathbf{u}_x, \nabla_{\mathbf{x}} V >_N - \Delta V = \frac{\Delta V}{3}$ , on peut alors résoudre l’égalité  $\nabla E(\mathbf{u}_x, \lambda_1) = 0$  dont la solution explicite est  $\mathbf{u}_x^\alpha = \frac{\Delta V}{3} \frac{(\nabla_{\mathbf{x}} V)_\alpha}{\|\nabla_{\mathbf{x}} V\|^2}$ .

Dans un second temps, on suppose que  $\mathbf{u}_x$  est désormais appliqué. Nous obtenons donc une surface intermédiaire dénoté  $S^*$ . La moitié de l’erreur restante est alors corrigée suivant l’axe  $y$ . L’unique variable restante est  $\mathbf{u}_y$ , et la contrainte stricte est cette fois exprimée par

$$V(\mathbf{p}_x + \mathbf{u}_x, \mathbf{p}_y + \mathbf{u}_y, \mathbf{p}_z) - \bar{V} = \frac{2\Delta V}{3} \Rightarrow \langle \mathbf{u}_y, \nabla_{\mathbf{y}} V^* \rangle_N = \frac{\Delta V}{3},$$

où  $V^*$  indique que le volume est cette fois calculé sur  $S^*$ . La solution s’obtient de façon identique au premier cas.

Enfin, on obtient à nouveau une surface intermédiaire, dénotée  $S^{**}$ . On corrige alors totalement l’erreur résiduelle. En suivant les notations utilisées, on obtient la dernière contrainte  $\langle \mathbf{u}_z, \nabla_{\mathbf{z}} V^{**} \rangle_N = \frac{\Delta V}{3}$ .

Au final, on peut exprimer la solution analytique par

$$(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z) = \frac{\Delta V}{3} \left( \frac{\nabla_{\mathbf{x}} V}{\|\nabla_{\mathbf{x}} V\|^2}, \frac{\nabla_{\mathbf{y}} V^*}{\|\nabla_{\mathbf{y}} V^*\|^2}, \frac{\nabla_{\mathbf{z}} V^{**}}{\|\nabla_{\mathbf{z}} V^{**}\|^2} \right). \quad (4)$$

Du point de vue du temps de calcul, trois passes successives sont nécessaires afin de calculer les gradients en  $x$ ,  $y$  et enfin  $z$  sur des surfaces différentes. La complexité est cependant linéaire suivant le nombre de sommets du maillage et ne nécessite que trois fois plus de calcul que la simple évaluation du volume du domaine.

On pourra remarquer que si la rapidité est cruciale, une version linéarisée au premier ordre de la contrainte [SHB07] permet d’obtenir un résultat visuellement identique où cette fois les trois gradients sont appliqués sur la même surface déformée. Un seul passage suffit alors pour calculer ces trois paramètres.

## 4 Contrôle local de la déformation, application au skinning

Après avoir posé le cadre mathématique de la préservation de volume, nous allons étendre celui-ci afin de permettre une correction locale sur la forme. Le calcul automatique de cette localisation sera réalisé en utilisant les paramètres de la déformation par skinning.

### 4.1 Skinning

Le skinning classique ou Subspace Skeleton Deformation (SSD) permet de définir la déformation d’une surface quelconque en fonction de la position et de l’orientation d’un squelette. Celui-ci consiste en

une organisation hiérarchique de repères appelés joints. Un os du squelette est défini comme le segment reliant deux joints consécutifs. La méthode de skinning classique définit la position du joint déformé  $\mathbf{p}$  comme une combinaison linéaire de la position et orientation des joints

$$\mathbf{p}_\alpha = \sum_{i=1}^{b_\alpha} \omega_{ki} T_i \bar{T}_i^{-1} \bar{\mathbf{p}}_\alpha, \quad (5)$$

où les vecteurs sont ici représentés en coordonnées projectives.  $b_\alpha$  correspond au nombre de joints dont dépend le sommet  $\alpha$ ,  $T_i$  est la matrice de transformation  $4 \times 4$  du joint  $i$ .  $\bar{T}_i$  correspond à la matrice de transformation du même joint, mais en position de repos. Les poids de skinning  $\omega_{\alpha i}$  fournissent la combinaison affine des transformation des joints en partant de la pose de repos  $\bar{\mathbf{p}}_\alpha$ . Ces poids sont contraints à être positifs et tels que leur somme soit unitaire sur chaque sommet.

Les poids de skinning sont généralement peints à la main sur la surface par un artiste. Dans notre cas, nous utiliserons un modèle simple où les poids (avant normalisation) seront définis automatiquement par  $\omega_{\alpha i} = d(\alpha, i)^f$ , où  $d(\alpha, i)$  est la distance entre le sommet  $\alpha$  et l'os  $i$ , et  $f > 0$  est un simple facteur que l'on peut ajuster.

Un exemple classique de cylindre utilisé dans ce rapport illustre le comportement classique du skinning. Le cylindre possède un squelette composé de deux os connectés par un joint comme le montre la Fig. 4. La couleur correspond à l'influence des poids  $\omega_1$  et  $\omega_2$  liant les deux os aux sommets de la surface. Une perte de volume d'environ 11% peut être mesurée sur la figure de droite.

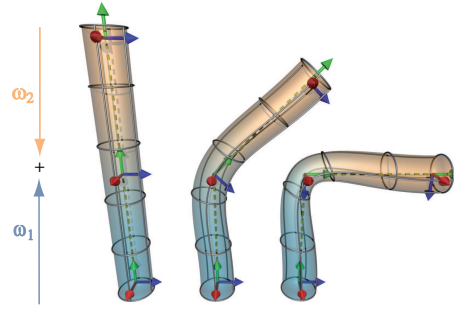


FIGURE 4 – Exemple du skinning classique appliqué à un cylindre avec un squelette composé de deux os. La perte de volume sur la figure de droite correspond à 11% de sa valeur initial. La variation étant spécialement localisée proche du joint, elle a un réel impact visuel.

Notons finalement que seul le cas du skinning classique est présenté. Cependant, la méthode s'adapte de façon triviale à toutes améliorations de cette méthode.

## 4.2 Carte de correction

La méthode de contrainte de volume du chap. 3.3 peut être appliquée directement sur l'ensemble des sommets de la surface. Cependant ce type d'approche naïve ne permet pas d'obtenir de résultat convainquant comme le montre la Fig. 5. Dans le cas de ce cylindre déformé par skinning, l'ensemble des sommets sont déplacés par une valeur relativement uniforme ce qui ne fournit quasiment aucun impact visuel à l'exception des deux sommets extrêmes qui ne correspond à priori pas à la correction du problème du "collapsing elbow".

Pour obtenir une correction plus réaliste, il est nécessaire de définir des zones où la correction  $\mathbf{u}$  doit agir en priorité par rapport à d'autres. Typiquement, dans le cas du cylindre, les bords extrêmes ne doivent pas être déplacés, contrairement à ceux proche du coude.

La méthode de préservation de volume définie au chap 3.3 s'applique de façon globale sur la surface. Par la suite, nous généralisons cette approche afin de permettre l'application de déformations locales. Nous définissons une carte de correction permettant de pondérer la déformation à appliquer sur certaines régions localisées plus qu'à d'autres. Désignons le poids de pondération associé au sommet  $\alpha$  par  $\gamma_\alpha > 0$ .

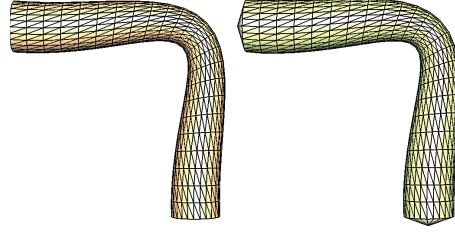


FIGURE 5 – Cas d’une correction de volume naïve appliquée de façon identique pour chaque sommet. La figure de gauche est le cas du skinning classique alors que celle de droite montre le cylindre après correction de volume uniforme.

Afin de permettre une correction plus grande des zones fortement pondérées, la norme 2 utilisée dans l’eq. 2 est désormais remplacée par une norme pondérée  $\|\mathbf{a}\|_\gamma$ , où  $\mathbf{a}$  est un vecteur quelconque de  $\mathbb{R}^N$  et

$$\|\mathbf{a}\|_\gamma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(a_i)^2}{\gamma_i}} \quad (6)$$

En utilisant désormais cette norme pour la minimisation des déformation en eq. 2, il peut être montré que la solution analytique reste sous une forme quasiment identique. Pour un sommet  $\alpha$ , on a alors

$$(\mathbf{u}_x^\alpha, \mathbf{u}_y^\alpha, \mathbf{u}_z^\alpha) = \frac{\Delta V}{3} \gamma_\alpha \left( \frac{(\nabla_{\mathbf{x}} V)_\alpha}{\|\nabla_{\mathbf{x}} V\|_{\gamma^{-1}}^2}, \frac{(\nabla_{\mathbf{y}} V^*)_\alpha}{\|\nabla_{\mathbf{y}} V^*\|_{\gamma^{-1}}^2}, \frac{(\nabla_{\mathbf{z}} V^{**})_\alpha}{\|\nabla_{\mathbf{z}} V^{**}\|_{\gamma^{-1}}^2} \right), \quad (7)$$

avec cette fois  $\|\mathbf{a}\|_{\gamma^{-1}}^2 = \sum_{k=1}^N \gamma_k a_k$ .

Il reste désormais à définir ces poids  $\gamma$  de façon lisse sur la surface. Une première approche consiste à peindre directement ceux-ci sur la surface. Cependant, afin d’éviter un travail supplémentaire à l’artiste, un calcul automatique de ceux-ci adapté à la déformation mise en oeuvre doit être développé. Pour cette raison, nous nous intéressons dans la partie suivante au cas du calcul automatique de ces poids en liens avec la déformation par skinning.

### 4.3 Pré-calcul des cartes de corrections

Afin d’obtenir une correction localisée dans le coude cylindrique, on recherche à définir les poids  $\gamma$  de façon à obtenir une fonction continue sur la surface avec des valeurs faibles aux extrémités et plus importantes au niveau du joint.

En effet, les zones éloignées du joint ne vont dépendre principalement que d’un unique os (zones bleue et rouge sur la Fig. 6). Les sommets seront donc transformés d’une façon quasi-rigide et il n’y aura pas de perte de volume. Ces zones sont caractérisées par le fait qu’un de leurs poids de skinning est proche de 1. D’un autre côté la zone de transition (en mauve) dépend des deux os à la fois. Il n’y a donc pas de poids de skinning proche de 1. C’est dans cette région que la déformation de la surface donne lieu à la perte de volume de par la combinaison linéaire entre matrices. C’est également dans celle-ci que l’on va localiser la correction de volume.

Afin de caractériser cette région de façon automatique le poids de skinning maximum est pris en compte, et l’on prend pour un sommet  $\alpha$

$$\gamma_\alpha = (1 - \max_i (\omega_{\alpha i}))^g, \quad (8)$$

où le max varie sur tout les os dont dépend le sommet  $\alpha$ , et  $g$  est un paramètre que l’on peut ajuster.

Un telle carte de correction appliquée sur le cylindre ainsi que les résultats obtenus sont montrés en Fig. 7. Dans ce cas, on peut constater que la correction de volume localisée au niveau du coude permet



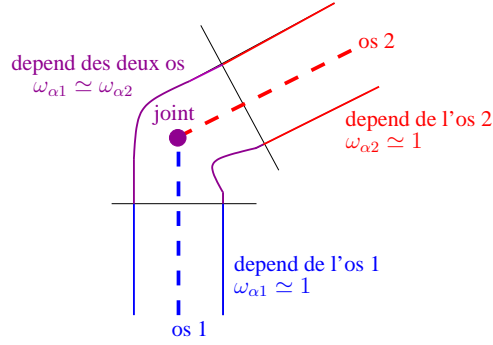


FIGURE 6 – Dépendances de la surface aux os correspondant suivant les poids de skinning dans le cas du cylindre. La zone rouge correspond à une région dépendant fortement de l'os 1, alors que la zone bleue symbolise une région dépendant principalement de l'os 2. La zone centrale mauve correspond à la zone de transition où les sommets dépendent des deux os.

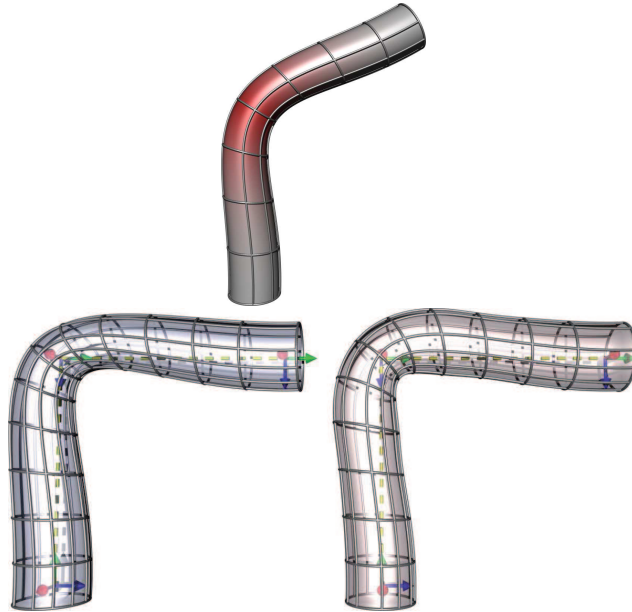


FIGURE 7 – Localisation de la correction de volume suivant la carte de déformation donné par  $\gamma$ . La première figure donne l'amplitude de  $\gamma$  encodé en rouge sur le modèle du cylindre. La seconde figure montre le résultat obtenu. A gauche, le cylindre est déformé par skinning classique alors que celui de droite est obtenu après correction.

de limiter fortement l'effet de "collapsing elbow" en gardant un rayon du cylindre quasiment constant.

Dans le cas de la correction exacte en trois passes, l'application de cette correction pour une implémentation simple après un skinning classique d'un cylindre de 600 est obtenue à 30 images par secondes (45 sans la correction). Le cas de la préservation linéarisé présenté en partie 3.3 est obtenu à 35 images par secondes.

## 5 Correction de volume dans la direction normale

La méthode de déformation précédente permet d'obtenir une correction d'aspect réaliste au niveau d'une zone localisée. Cependant, cette préservation considère un a-priori de correction d'un tiers de l'écart en

volume sur chacun des axes quelque soit la forme et la déformation de l'objet.

Cela n'est pas forcément souhaitable lors de déformations dans une direction privilégiée. De plus, la méthode est intrinsèquement liée au choix des axes ainsi qu'à l'ordre des corrections. Dans le cas d'un effet naturel, on peut prévoir qu'un gonflement/dégonflement aura lieu dans une direction normale à la forme de l'objet.

## 5.1 Solution dans le cas d'une correction normale

Nous considérons donc par la suite que  $\mathbf{u}$  va être contraint à rester normale à la surface déformée afin de mieux prendre en compte les propriétés locales de celle-ci. En désignant par  $\mathbf{n}^\alpha = (n_x^\alpha, n_y^\alpha, n_z^\alpha)$  la normale au sommet  $\alpha$ , on recherche alors le paramètre scalaire  $\rho_\alpha$  tel que l'on ait  $(\mathbf{u}_x^\alpha, \mathbf{u}_y^\alpha, \mathbf{u}_z^\alpha) = \rho_\alpha \mathbf{n}^\alpha$ .

On dénote de façon vectorielle  $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)$ , et par  $\mathbf{p}$  le vecteur de  $\mathbb{R}^{3N}$  formé par  $(p_x^1, p_y^1, p_z^1, p_x^2, \dots, p_z^N)$ . Enfin, on notera de façon simplifiée  $\rho \mathbf{n} = (\rho_1 n_x^1, \rho_1 n_y^1, \rho_1 n_z^1, \rho_2 n_x^2, \dots, \rho_N n_z^N)$ .

En reprenant la minimisation de l'eq. 2 avec la norme de l'eq. 6, on obtient

$$\begin{cases} \min & \|\rho\|_\gamma^2 \\ \text{ sujet à } & V(\mathbf{p} + \rho \mathbf{n}) = V(\mathbf{p}) . \end{cases} \quad (9)$$

Cette fois, la résolution analytique ne peut plus utiliser directement la trilinearité de l'expression de la contrainte car les corrections sur les axes sont liées. Il est donc nécessaire de linéariser au premier ordre cette contrainte de volume.

On suppose que  $\|\rho\|$  est relativement faible afin de pouvoir négliger les termes d'ordres supérieurs et que l'on ait  $V(\mathbf{p} + \rho \mathbf{n}) \simeq \langle \rho \mathbf{n}, \nabla V(\mathbf{p}) \rangle_{3N} - \Delta V$ . La fonctionnelle d'énergie du Lagrangien peut alors s'exprimer par

$$E(\rho, \lambda) = \|\rho\|_\gamma^2 - \lambda(\langle \rho \mathbf{n}, \nabla V(\mathbf{p}) \rangle_{3N} - \Delta V) \quad (10)$$

Les équations étant cette fois linéaires, la solution analytique s'exprime, pour un sommet  $\alpha$ , par

$$\rho_\alpha = \Delta V \frac{\gamma_\alpha \langle \mathbf{n}^\alpha, \nabla V(\mathbf{p}_\alpha) \rangle}{\sum_i \gamma_i \langle \mathbf{n}^i, \nabla V(\mathbf{p}_i) \rangle^2} , \quad (11)$$

où  $\nabla V(\mathbf{p}_\alpha) \in \mathbb{R}^3$  est le gradient de l'expression du volume exprimé au point  $\mathbf{p}_\alpha$  et où  $\langle , \rangle$  est le simple produit scalaire de  $\mathbb{R}^3$ .

Dans la suite du chapitre, nous allons définir deux effets visuels différents en fonction du choix de la norme de minimisation. Dans un premier temps, nous montrerons qu'une pondération de la norme suivant une carte uniforme radialement permet d'obtenir un effet proche d'un objet en caoutchouc. Et dans un second temps, nous obtiendront un effet de type organique en modifiant le calcul de la carte de déformation.

## 5.2 Effet de caoutchouc

Nous allons montrer que le choix d'une norme de pondération uniforme radialement va nous permettre d'obtenir un effet de type caoutchouc sur un objet après correction du volume.

Dans le cas du cylindre skinné ayant subi une rotation, les sommets situés dans le creu du coude sont plus proches les uns des autres que dans les régions opposées et latérales. Pour les sommets situés dans ces régions, le gain en volume pour un même déplacement sera donc plus important. Une minimisation utilisant la norme définie au chap. 4.3 eq. 8 permet donc de compenser principalement la perte de volume hors du creux dû au skinning, d'où un gonflement latéral.

L'aspect d'une déformation d'un cylindre en caoutchouc est montré en Fig. 8.

Cet effet permet de modéliser de façon simple un aspect visuel de déformation de type caoutchouc de manière purement géométrique.

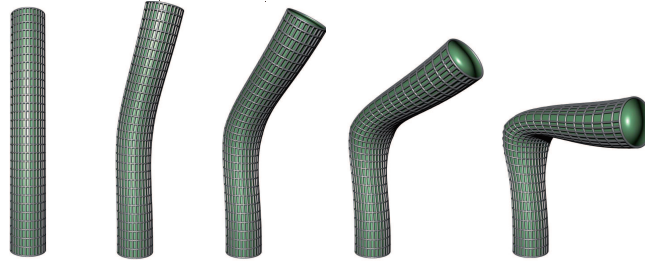


FIGURE 8 – Déformation avec effet de caoutchouc. La compensation du volume perdu dans le coude est distribuée principalement sur les parties latérales, provoquant un aplatissement du cylindre.

### 5.3 Effet organique

Dans le cas où l'on souhaite obtenir une correction permettant de se rapprocher d'un aspect organique, il va être intéressant de considérer cette fois une carte de correction non uniforme radialement autour du cylindre.

D'un point de vue physique les gonflements des muscles du bras, ou des parties adipeuses d'un doigt par exemple, se situent principalement du côté le plus éloigné du squelette anatomique. Nous allons donc excentrer le squelette du cylindre afin de rapprocher le joint central d'une partie de la surface. De plus, la carte de déformation va maintenant dépendre de la distance aux os afin d'obtenir une correction plus importante dans les régions caractérisées comme adipeuses.

Cette fois, la valeur de la carte de déformation en un sommet  $\alpha$  est donnée par

$$\gamma_{\alpha} = (1 - \max_i(\omega_{\alpha i}))^{g_1} \min_i(d(\alpha, i))^{g_2}, \quad (12)$$

où le second terme vient pondérer plus fortement les sommets situés loin des os. On rappelle que  $d(\alpha, i)$  correspond à la distance entre l'os  $i$  et le sommet  $\alpha$ .  $g_1$  et  $g_2$  jouent ici le rôle de facteurs d'ajustements.

Dans ce cas, le type de correction obtenu se rapproche plus d'un aspect organique. En prenant le cas du cylindre avec un squelette excentré, on obtient un type de déformation proche de celui d'un doigt plié comme le montre la Fig. 9. Les poids calculés de façon automatique incitent la déformation à agir

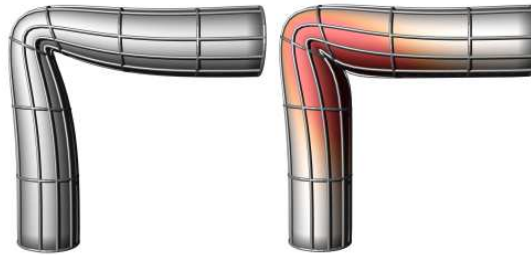


FIGURE 9 – Conservation du volume appliquée sur le cas du cylindre excentré avec une carte de poids donné en eq. 12. La coloration indique l'amplitude de la déformation.

préférentiellement dans la zone éloignée de l'os. L'excentrage du squelette permet d'obtenir un coude de pliure relativement droit comme celui d'un doigt.

D'un point de vue complexité, une seule passe est nécessaire, une implémentation simple de la correction sur le cas d'un cylindre de 600 sommets est obtenue à 30 images par secondes (skinning seul à 45 images par secondes).

## 6 Discussion

Une première méthode de préservation de volume exacte a été développée en réalisant trois corrections successives de façon indépendante sur chaque axe. Associée à une pondération de l'amplitude de la correction sur les sommets, cette technique permet d'obtenir des résultats visuellement convaincants. Cependant, cette méthode souffre de limitations dans le choix arbitraire de l'ordre des axes. En effet, réaliser la correction en  $x$  puis  $y$  et  $z$  ne fournit pas exactement la même correction que celle réalisée en commençant par  $y$  puis  $x$  et enfin  $z$ .

De plus, le lien à un système d'axe indépendant de la forme peut engendrer des effets non souhaités lors d'une animation. Si l'on suppose que tout l'objet subit une lente rotation autour d'un axe, la correction de volume sera, quant à elle, différente pour chaque angle. Afin de limiter ce type d'artefacts, il est possible de considérer un système d'axes local à l'objet qui pourrait typiquement être lié au squelette de la forme.

Une autre limitation consiste à devoir fixer par avance une correction de  $1/3$  suivant chaque axe. Ce type de correction n'est pas l'effet désiré, ni dans le cas d'un muscle, ni dans celui du cylindre en caoutchouc. Ce facteur pourrait cependant être modifié en ayant connaissance d'un axe de déformation préférentiel. Par exemple, dans le cas du cylindre en caoutchouc, un précalcul pourrait définir à l'avance un pourcentage de correction plus élevé suivant l'axe de rotation du joint.

La seconde méthode présentée s'adapte localement à la surface en modélisant une déformation le long de la normale de l'objet. Plus proche de la physique pour modéliser un effet de gonflement, cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de nécessiter la linéarisation de la contrainte.

Cette approximation suppose que les termes de corrections carrés ou cubiques sont négligeables devant ceux du premier ordre. C'est à dire, que la correction de volume reste faible. Ce point n'est pas forcément respecté dans le cas de grandes déformations où la variation de volume est importante. L'itération par un pas de temps plus faible ne permet pas de régler directement le problème car la méthode de skinning déforme l'objet en partant de la pose initiale. On notera cependant que visuellement, nous ne sommes pas sensibles à la valeur même du volume (voir Fig. 5), mais aux modifications locales de la forme. L'impact visuel d'une correction exacte n'est pas forcément ressenti. Le tableau 1 résume la variation de volume avant et après correction linéarisée pour différents angles.

angle (°)	0	10	30	50	70	90
erreur avant correction (%)	0	0.2	1.5	4	7	11
erreur après correction dans la direction normale (linéarisé) (%)	0	0.05	0.5	1.5	3.1	4.9

TABLE 1 – Erreur relative du volume du cylindre de 256 sommets déformés avant et après correction linéarisée pour différents angles.

On peut également proposer deux méthodes de déformation pouvant limiter l'effet de la linéarisation. Dans un premier temps, on peut corriger le volume en une série de petites étapes. Ainsi, à la place de corriger la variation de volume totale  $\Delta V$  en une unique étape, on ne rectifie que la variation  $\frac{\Delta V}{M}$ , avec  $M > 1$ . On considère alors la surface intermédiaire obtenue. Après avoir calculé la nouvelle erreur de volume à rectifier, on itère la correction jusqu'au seuil souhaité. Dans chaque cas, l'amplitude de  $p$  est divisée par  $M$  et permet donc une meilleure approximation.

Dans le cadre d'une application à l'animation, nous pouvons également considérer une suite de faibles déplacements du squelette lors du skinning. Il est alors nécessaire de modifier la pose de départ au fur et à mesure des itérations de sorte à obtenir une surface skinnée délimitant continuellement un volume  $\bar{V}$ . Ceci est obtenu en multipliant la surface déformée par les matrices de transformation inverses  $T_i^{-1}$  [KJP02]. La variation de volume pour un angle donné serait alors limitée par le nombre d'étapes intermédiaires.

On notera également que l'ensemble de ces méthodes ne sont pas totalement insensibles aux types de maillages utilisés. En effet, on considère l'évaluation de  $\nabla V$  sur le maillage triangulé qui correspond aux variations de volume obtenues pour un déplacement infinitésimal dans chaque direction. Si le 1-voisinage du sommet possède une surface importante, la norme  $\|\nabla V\|$  sera alors plus importante que dans le cas d'un maillage plus resserré.

Une façon de rendre la correction plus indépendante du type de maillage serait par exemple de pondérer l'évaluation du gradient du volume en chaque sommet par l'aire de son 1-voisinage.

## 7 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté une méthode de préservation de volume purement géométrique obtenue comme une surcouche de la méthode de déformation par skinning. Dans le cas de la recherche d'une correction exacte, une méthode déformant la surface en trois étapes suivant des axes orthogonaux est explicitée. Associée à une pondération des sommets calculée automatiquement, la correction peut être localisée dans les régions souhaitées. Celle-ci permet ainsi de traiter directement le cas de grandes déformations de façon exacte.

Une méthode de déformation plus proche d'un gonflement physique est également présentée. Elle permet d'obtenir des effets visuellements proche de certains paramètres physiques tels que le comportement de matière en caoutchouc, ou d'une forme organique.

Seul le cas d'un cylindre avec un joint a été présenté. Cependant son cadre d'application, ainsi que la définition des cartes de déformation est suffisamment large pour s'adapter sans autres contraintes aux cas de formes présentant de multiples embranchements.

La méthode peut également se généraliser dans le cas de déformations d'objets plus complets comme des personnages ou des animaux. Cependant, il sera alors nécessaire d'obtenir une évaluation locale de la variation de volume à corriger suivant certaines régions. Pour cela, une segmentation de l'objet en régions est nécessaire afin d'estimer localement la variation de volume.

Enfin, il est tout à fait envisageable de calculer la correction de volume directement sur GPU avec une carte de poids stockée sous forme de texture. Son application permettrait de corriger directement les maillages complexes en temps réel.

## Références

- [Ale02] M. Alexa. Linear combination of transformations. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 380–387, 2002.
- [AS07] A. Angelidis and K. Singh. Kinodynamic skinning using volume preserving deformations. In *Symposium on Computer Animation*, 2007.
- [Blo02] J. Bloomenthal. Medial-based vertex deformation. In *Symposium on Computer Animation*, pages 147–151, 2002.
- [Cia88] Philippe G. Ciarlet. *Introduction to Numerical Linear Algebra and Optimization*. Cambridge University Press, 1988.
- [dATTS08] E. de Aguiar, C. Theobalt, S. Thrun, and H.-P. Seidel. Automatic Conversion of Mesh Animations into Skeleton-based Animations. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics EG'08)*, 27(2) :xx–xx, 4 2008.
- [Elb01] G. Elber. Multiresolution curve editing with linear constraints. In *6th ACM/IEEE Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 109–119. Ann Arbor, Michigan, June 2001.
- [FTS06] W. Von Funck, H. Theisel, and H.-P. Seidel. Vector field based shape deformations. *ACM Trans. Graph.*, 25(3) :1118–1125, 2006.
- [GOMP98] Carlos Gonzalez-Ochoa, Scott McCammon, and Jrg Peters. Computing moments of objects enclosed by piecewise polynomial surfaces. *Transactions on Graphics*, 17(3) :143–157, 1998.
- [HSL<sup>+</sup>06] J. Huang, X. Shi, X. Liu, K. Zhou, L. Wei, S. Teng, H. Bao, B. Guo, and H. Shum. Subspace gradient domain mesh deformation. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 1126–1134, 2006.

- [JT05] D. L. James and C. D. Twigg. Skinning mesh animations. *ACM Trans. Graph.*, 24(3), August 2005.
- [KJP02] P. Kry, D. L. James, and D. K. Pai. EigenSkin : Real time large deformation character skinning in hardware. In *Symposium on Computer Animation*, pages 153–159, 2002.
- [KZ05] L. Kavan and J. Zara. Spherical blend skinning : a real-time deformation of articulated models. In *Symposium on Interactive 3D Graphics and games*, pages 9–16, 2005.
- [LCF00] J. P. Lewis, M. Cordner, and N. Fong. Pose Space Deformation : A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 165–172, 2000.
- [MG03] A. Mohr and M. Gleicher. Building efficient, accurate character skins from examples. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :562–568, July 2003.
- [SCOLA04] O. Sorkine, D. Cohen-Or, Y. Lipman, and M. Alexa. Laplacian surface editing. In *Symposium on Geometry Processing*, 2004.
- [SHB07] Basile Sauvage, Stefanie Hahmann, and Georges-Pierre Bonneau. Volume preservation of multiresolution meshes. *Computer Graphics Forum*, 26(3) :275–283, 2007.
- [SY07] S. Schaeffer and C. Yuksel. Example-based skeleton extraction. In *Symposium on Geometry Processing*, pages 153–162, 2007.
- [WP02] X. C. Wang and C. Phillips. Multi-weight enveloping : Least-squares approximation techniques for skin animation. In *Symposium on Computer Animation*, pages 129–138, 2002.
- [WPP07] R. Y. Wang, K. Pulli, and J. Popovic. Real-time enveloping with rotational regression. *ACM Trans. Graph.*, 26(3), 2007.
- [ZHS<sup>+</sup>05] K. Zhou, J. Huang, J. Snyder, X. Liu, H. Bao, B. Guo, and H. Shun. Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian. *ACM Trans. Graph.*, 24 :496–503, 2005.